

# L'énergie solaire thermique à concentration

## Problématique

La consommation d'énergie primaire mondiale reste dominée par les énergies fossiles, avec des conséquences économiques et environnementales de plus en plus évoquées : coûts croissants liés à la hausse des prix des ressources fossiles et fissiles, niveau limité de sécurité énergétique, contribution à la pollution locale et aux changements climatiques, dont les impacts pourraient être dramatiques.

Dans ce contexte, l'exploitation des énergies renouvelables est de plus en plus cruciale, et parmi ces énergies, une idée ancienne (les Grecs utilisaient un ancêtre du miroir parabolique pour produire la flamme olympique) et très prometteuse est celle de la concentration du rayonnement solaire (la source renouvelable la plus abondante) pour produire de la chaleur à haut niveau de température.

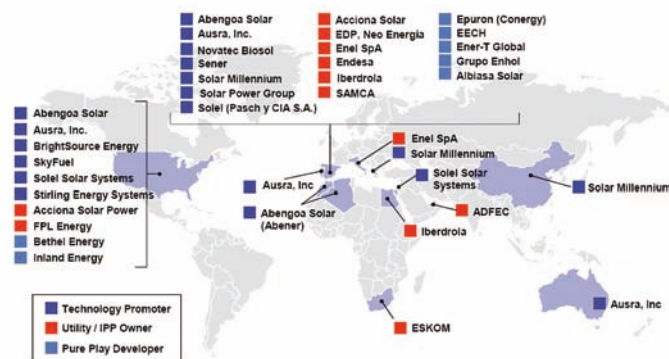
La capacité installée des centrales solaires thermiques de concentration (notées CSP selon la terminologie anglaise *Concentrating Solar Power*) est de l'ordre de 500 MW. Les premières centrales furent installées en Californie à la fin des années 80 et au début des années 90 (354 MW, miroirs cylindro-paraboliques, avec gaz naturel comme source secondaire). Plusieurs projets sont actuellement en cours d'implantation ou de développement (Espagne, Grèce, États-Unis, Égypte, Maroc, Algérie, etc.) cumulant une capacité de plus de 3 000 MW au total dans le monde une fois ces projets achevés, dont plus de 2 000 MW en Espagne (figures 1 et 2).

## Principes de base

### Irradiation solaire et potentiel

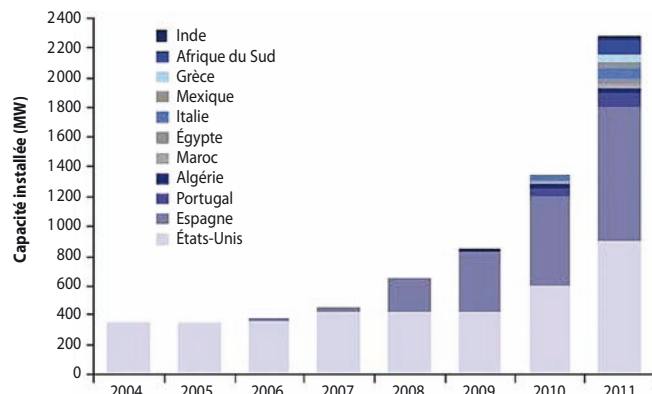
L'irradiation solaire globale est constituée de l'irradiation directe et de l'irradiation diffuse. L'énergie solaire peut être utilisée pour un usage thermique direct, par exemple pour le chauffage, la cuisson, pour produire de l'électricité à partir des systèmes photovoltaïques (utilisation de l'irradiation directe et diffuse), et finalement pour produire de la chaleur puis de l'électricité à partir des systèmes thermiques à concentration. Ces derniers systèmes utilisant seulement l'irradiation directe, ils ne peuvent être installés que dans des zones fortement ensoleillées (figure 3). Ainsi, un ensoleillement de 1 800 kWh/m<sup>2</sup>/an est le seuil minimum estimé nécessaire pour obtenir un rendement suffisant.

Figure 1 – Projets en cours



Source: Emerging Energy Research.

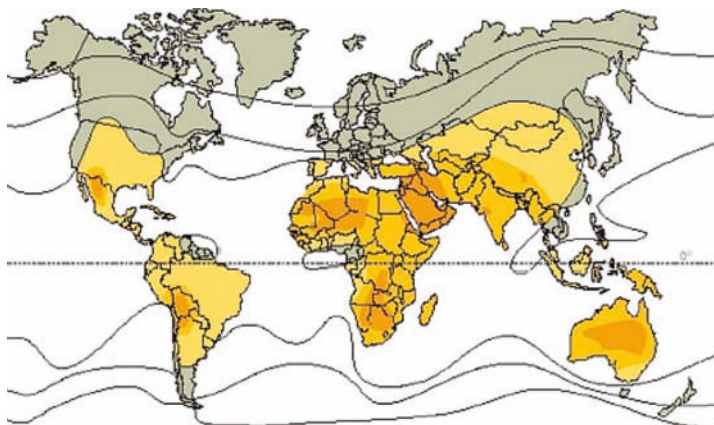
Figure 2 – Capacité installée prévue en 2011



Source: Emerging Energy Research.

Les mesures du gisement solaire ont concerné essentiellement, dans un premier temps, la durée d'ensoleillement. Avec l'avènement des technologies solaires modernes, l'évaluation du contenu énergétique a gagné de l'importance. Actuellement, les données sur le gisement solaire sont disponibles auprès des agences météorologiques nationales et internationales, des établissements chargés du développement des technologies solaires ainsi que des établissements de recherche.

**Figure 3 – Zones appropriées pour l'installation de centrales solaires thermiques à concentration**



Source: Solar Thermal Power, European Commission, Directorate General TREN

Approprié pour les centrales solaires:  
 ■ excellent ■ bon ■ acceptable ■ non approprié

Source: WEC, 2004.

## Trois concepts de CSP

Trois concepts ont été développés et plus ou moins déjà commercialisés: les centrales à miroirs cylindro-paraboliques, les centrales à tour solaire et les centrales à miroirs paraboliques (figure 4). En fonction du niveau de température de la chaleur, l'énergie solaire à concentration peut être utilisée pour faire fonctionner des centrales à vapeur, des turbines à gaz ou des engins Stirling.

## Les composantes d'une centrale CSP

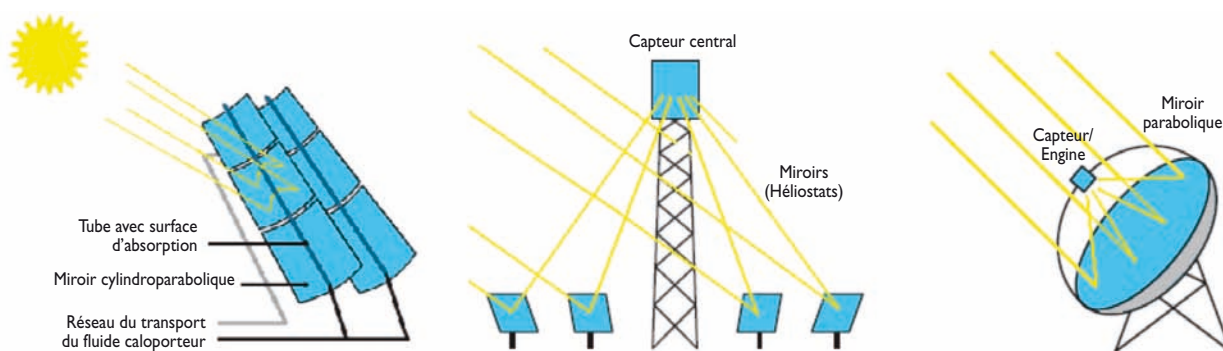
Les composantes de base d'une centrale CSP (figure 5) sont:

1. *Le champ solaire*, qui représente l'équivalent de l'alimentation en combustible (charbon, pétrole, gaz, uranium) pour les centrales thermiques. Dans les centrales CSP de type Fresnel, le champ solaire joue aussi le rôle de la chaudière, vu que la production de la vapeur se fait elle aussi au niveau du champ solaire. Le champ solaire est composé de miroirs cylindro-paraboliques, qui concentrent les rayons solaires sur un tube noir (le capteur) formant l'axe focal des miroirs. Les rayons solaires sont absorbés à la surface noire, transformés en chaleur, qui est transférée au fluide caloporteur traversant le capteur.
2. *Le réseau de conduites*, qui assure le transfert du fluide caloporteur chauffé du champ solaire vers l'unité de production d'électricité et son retour après refroidissement vers le champ solaire.
3. *L'unité de puissance* (c'est-à-dire l'unité de production d'électricité), qui contient les pompes à eau de haute pression, les échangeurs de chaleur pour le préchauffage de l'eau, la production de vapeur, le chauffage de la vapeur, la turbine à vapeur, le générateur, le tour de refroidissement et l'unité de déminéralisation (non mentionnée dans le schéma), requise pour éviter la formation de cristaux de sel très abrasifs dans la turbine.

Les composantes en option d'une centrale CSP sont:

1. *Source de chaleur supplémentaire*: L'intégration d'une source supplémentaire de chaleur réduit l'impact de l'intermittence du rayonnement solaire sur la production d'électricité. Un autre effet de cette introduction a été la réduction du coût moyen de production du kWh; ce fut le cas pour les centrales solaires de la Californie étant donné le niveau des prix du gaz à la fin des années 80. Actuellement, étant donné

**Figure 4 – Les concepts technologiques de CSP et leurs caractéristiques de base**



### (a) Miroirs cylindro-paraboliques

Les miroirs cylindro-paraboliques (en forme d'auge) concentrent les rayons solaires sur l'axe focal, sur lequel se trouve le tube absorbeur.

Les températures atteintes sont de l'ordre de 400 °C. Pour réduire les pertes de chaleur par conductivité et par convection, le tube absorbeur est protégé par un tube en verre avec un vide poussé entre les deux.

### (b) Tour solaire

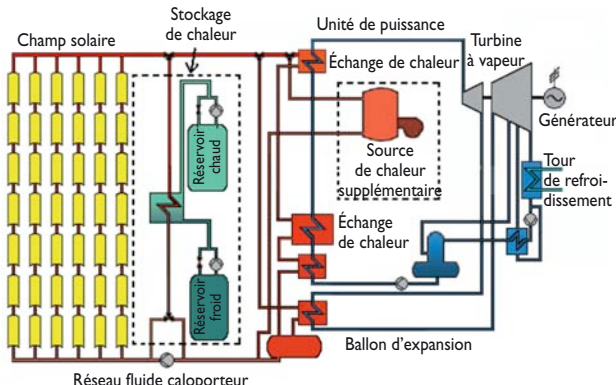
Un champ circulaire de miroirs concentre les rayons solaires sur un capteur localisé au sommet d'une tour. Le fluide caloporteur (air, eau, sels fondus, sodium,) transporte la chaleur vers le système de production d'électricité. Des températures très élevées dépassant 1 000 °C peuvent être atteintes, ce qui permet la réalisation d'un cycle combiné avec une grande performance.

### (c) Miroir parabolique

Un miroir parabolique concentre les rayons solaires sur un capteur qui se trouve approximativement au point focal de la parabole.

Des températures de 750 °C à 1 000 °C sont atteignables. Ce niveau de température a permis, avec des engins Stirling, la réalisation de rendement de production d'électricité dépassant 30 %.

**Figure 5 – Les composantes de base ou en option d'une centrale CSP**



l'enrichissement foudroyant des ressources fossiles, la réduction des coûts d'investissement des centrales solaires et les objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, de plus en plus contraignants, cette option perd en importance.

2. **Élargissement du champ solaire et introduction d'un système de stockage de chaleur**: Cette option présente plusieurs avantages :
  - a. Améliorer la stabilité de la production en réduisant considérablement les pertes de qualité de production résultant des variations d'irradiation, par exemple dues aux passages de nuages ;
  - b. Permettre une production à base d'énergie solaire après le coucher du soleil ;
  - c. Permettre un démarrage de production avant le lever du soleil ;
  - d. Augmenter le facteur de capacité, qui peut atteindre, selon la capacité de stockage, le niveau des centrales répondant aux besoins en heures pleines et même celui des centrales de base. Ainsi, une centrale CSP avec une capacité de stockage permettant 15 heures de fonctionnement à puissance nominale est comparable à une centrale de base, vu que le rapport de la production annuelle à la puissance nominale dépasse alors 6500 heures par an.
  - e. Permettre une réduction du coût de production du kWh.
  - f. Vu que la réduction attendue des investissements sera essentiellement au niveau des composantes où le potentiel de développement est le plus important, le champ solaire et le système de stockage, l'impact économique de l'introduction de cette option ne peut que s'améliorer dans l'avenir.

## Le dimensionnement

Ce qui peut être défini en premier lieu est la puissance de la centrale. Cette grandeur est généralement soumise à un certain nombre de contraintes, qui sont soit technologiques (une technologie est généralement disponible entre deux puissances, une minimale et l'autre maximale), soit législatives (par exemple, en Espagne, la puissance unitaire d'une

centrale à concentration solaire ne peut excéder 50 MW pour bénéficier des avantages de la loi sur les énergies renouvelables). D'autres contraintes possibles sont la capacité du système d'absorber des ressources intermittentes (capacité et composition du parc de production, courbe de charge ainsi que l'état du réseau)<sup>1</sup>, la capacité du réseau de transport, etc. Si la demande est supérieure à l'une des deux contraintes imposées, il est possible d'installer plusieurs unités pour répondre à la demande en puissance.

Le volume de la production peut être la seconde grandeur cible. En général, pour les ressources intermittentes comme le rayonnement solaire et le vent, le volume de la production est défini par la puissance installée et par les caractéristiques du gisement sur le site. La production annuelle peut varier un peu d'une année à l'autre, mais la grandeur moyenne est pratiquement constante. Ainsi, pour augmenter le volume de la production, il faut augmenter la puissance installée.

Les centrales solaires à concentration présentent néanmoins une exception : il est possible d'augmenter le volume de production annuelle sans augmenter la puissance de la turbine, grâce au stockage de la chaleur excédentaire produite dans un champ solaire élargi, qui permet l'augmentation du facteur de capacité et l'amélioration de la qualité d'électricité produite. Ainsi, dans un concept de base, le champ solaire assure la couverture de la demande en chaleur pour la production de la vapeur permettant le bon fonctionnement du générateur à puissance nominale durant les heures où l'ensoleillement dépasse 95 % de la valeur maximale au site. Sous ces conditions, une centrale solaire à concentration dans la région d'Ouarzazate, au sud-est du Maroc, produirait environ 2250 MWh par MW installé. L'introduction d'une interface de stockage thermique et l'élargissement correspondant du champ solaire permettraient la prolongation de la production après le coucher de soleil, ainsi qu'une modulation (en fonction des caractéristiques du système de stockage) de la production en fonction de la demande. La durée totale de la production journalière à puissance nominale peut atteindre 24 heures en été. (Voir point 2 dans les composantes en option plus haut)

Dans le cas d'un système photovoltaïque (PV) ou éolien, l'augmentation de la production ne peut se faire qu'à partir d'une augmentation de la puissance installée. En effet, la production en l'absence de la source primaire (rayonnement solaire ou vent) ne peut se faire qu'avec stockage d'électricité produite durant le temps de disponibilité de la source primaire. On notera aussi que le stockage d'électricité est généralement plus coûteux que le stockage de chaleur. Cette différence des caractéristiques de la composante de stockage entre les systèmes CSP et PV est très importante. Une telle différence entre l'éolien et l'hydraulique (certainement plus accentuée :

1. Par exemple, l'intégration de 1 000 MW éoliens dans le parc de production marocain présenterait des risques pour la stabilité d'un réseau purement national (la connexion Maroc-Espagne a une puissance de 1 400 MW, représentant un apport stabilisateur pour le réseau en plus de l'apport énergétique), tandis que l'intégration de 2 000 MW CSP avec 9 heures de stockage peut être réalisée sans grand risque.



le stockage de l'eau à une hauteur donnée est plus facile que le stockage de la chaleur à une température voulue) est pour une bonne partie à l'origine de la différence du développement des deux technologies, donnant avantage à l'hydroélectricité.

Un autre point déterminant de la puissance installée des systèmes à concentration par unité de surface est l'ombrage mutuel des réflecteurs. Pour atteindre un ensoleillement complet des réflecteurs à partir d'une hauteur donnée du soleil sur l'horizon (17° par exemple), la distance entre les rangées devrait être 3 fois la largeur de la rangée elle-même. Ainsi, la surface des réflecteurs d'une centrale cylindro-parabolique ne représente au maximum que le tiers de la surface du champ solaire. Une augmentation de la distance augmenterait la durée journalière pendant laquelle les réflecteurs sont totalement ensoleillés, mais elle réduirait la puissance installée par unité de surface et augmenterait la longueur du réseau de transport du fluide caloporteur et par conséquent l'investissement et les pertes de chaleur, ce qui veut dire l'absorption d'une bonne partie du gain.

## Problèmes observés et solutions techniques

Nous nous limitons dans cette section aux centrales à miroirs cylindro-paraboliques, étant donné qu'elles constituent la technologie la plus avancée au niveau de l'utilisation industrielle des concepts CSP. Par ailleurs, nous pensons que, en grande majorité, les « problèmes » identifiés ne sont pas des problèmes qui entravent le bon fonctionnement de la technologie, mais des caractéristiques présentant un grand potentiel d'amélioration (et valables en général pour l'ensemble des concepts CSP thermiques).

### Intensité et intermittence

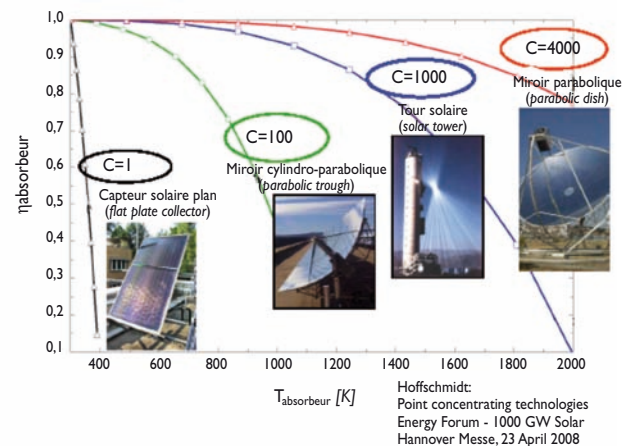
La puissance et le niveau de l'intermittence pour un site donné sont des caractéristiques naturelles du rayonnement solaire à la surface de la terre. Les systèmes CSP, recourant à la chaleur comme forme d'énergie intermédiaire, offrent des possibilités de stockage très importantes et, par conséquent, une réduction importante de l'impact des intermittences de la source.

### Température maximale du fluide caloporteur

La température qui peut être atteinte au niveau de l'absorbeur d'une centrale CSP dépend, en plus du niveau de perte de chaleur par convection, conduction et rayonnement, du facteur de concentration du rayonnement solaire et du débit du fluide caloporteur. Les pertes de chaleur augmentent considérablement avec l'augmentation de la température (figure 6). La température du fluide caloporteur à la sortie du champ solaire dépend essentiellement de deux paramètres : le débit et la stabilité thermique du fluide.

L'huile synthétique utilisée actuellement dans les systèmes à miroirs cylindro-paraboliques a encore une bonne stabilité thermique à 400 °C. Un fluide caloporteur supportant une

**Figure 6 – Température de l'absorbeur en fonction de la technologie**



température plus élevée permettrait une augmentation du rendement du système de production d'électricité. Les activités R&D visent, d'une part, le développement d'huiles avec une stabilité thermique plus grande et, d'autre part, la production directe de la vapeur d'eau dans le champ solaire. Les fluides utilisés dans les centrales à tour ou dans le système Stirling supportent des températures beaucoup plus élevées, mais ne s'adaptent pas aussi bien que l'huile synthétique utilisée aux conditions techniques des CSP cylindro-paraboliques.

### Puissance du champ solaire par unité de surface

La puissance installée par km<sup>2</sup> pour les centrales CSP avec champ de miroir cylindro-parabolique ou avec une tour est d'environ 50 MW. Pour les systèmes Dish-Stirling et les centrales PV avec suivi solaire biaxial, la puissance par km<sup>2</sup> est plus faible, résultant de l'ombrage biaxial mutuel des panneaux PV ou des réflecteurs (Dish).

La substitution des miroirs paraboliques dans la technologie CSP, par des miroirs Fresnel et des capteurs fixes, permettrait d'augmenter considérablement la puissance installée par unité de surface, grâce notamment à la réduction de l'ombrage mutuel des miroirs, car l'angle de rotation pour le suivi du soleil des miroirs Fresnel n'est que la moitié de l'angle de rotation des miroirs cylindro-paraboliques.

De plus, le capteur du système Fresnel étant fixe, il peut être plus lourd, plus volumineux et plus solide, pouvant ainsi supporter une plus grande pression de la vapeur haute pression dans le champ solaire. L'état fixe des conduites du fluide caloporteur réduit aussi les risques de fuite du fluide caloporteur et de l'usure mécanique par rapport au système cylindro-parabolique avec des parties flexibles.

Le système Fresnel présente en plus des conditions favorables à une utilisation secondaire de l'espace sous les miroirs, par une production agricole par exemple, ce qui augmenterait la valeur ajoutée créée par unité de surface. Cette production agricole pourrait valoriser l'eau de nettoyage des miroirs et bénéficier de la réduction d'évaporation résultant de la réduction sensible du rayonnement solaire direct arrivant au sol.

## L'entretien

L'expérience d'environ deux décades de fonctionnement des centrales CSP montre que les besoins d'entretien et de maintenance sont faibles, grâce au fait que les composantes des centrales sont des produits « classiques » des industries métallurgiques, énergétiques ou chimiques utilisés depuis des décennies. Néanmoins, un point important, bien que simple, est le nettoyage périodique des miroirs : l'accumulation de la poussière sur les miroirs peut réduire leur réflectivité considérablement et donc le rendement de la centrale. Un nettoyage adéquat conserve la bonne réflectivité initiale pendant de longues années.

## Les besoins en matériaux de construction

Les besoins en matériaux pour la construction et l'équipement des différents types des centrales CSP sont relativement importants. Ces matériaux sont principalement des produits des industries classiques (acier, verre, ciment, etc.), et ils sont pratiquement totalement recyclables. De plus, une partie de la R&D vise la simplification de montage et de démontage des installations à la fin de la vie des installations, et de faciliter le tri des différents matériaux en vue de leur réutilisation directe ou de leur recyclage plus facile et plus économique. Pour les systèmes PV avec suivi solaire, les besoins en matériaux classiques sont du même ordre que pour les CSP, mais les panneaux PV (surtout les systèmes couches minces) utilisent des métaux lourds et des éléments relativement rares ou toxiques, ce qui n'est pas le cas des CSP.

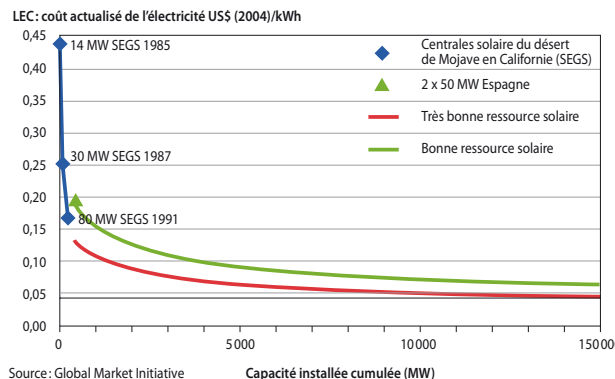
## Résultats attendus et stratégies de mise en œuvre

### Coûts

Les tarifs d'achat appliqués actuellement dans des pays du pourtour méditerranéen pour l'électricité d'origine CSP varient entre 0,16 €/kWh en Israël et 0,27 €/kWh en Espagne. Ces tarifs sont supérieurs au coût de production et la différence représente le levier qui encourage les investisseurs à s'engager dans cette voie. Les coûts de production (figure 7) diminuent fortement en fonction de la puissance totale installée, sous l'effet du cumul de l'expérience technologique et de l'effet d'échelle (capacité des centrales de plus en plus grande). Les coûts futurs pourraient être réduits jusqu'à 0,05-0,07 €/kWh, grâce à plusieurs facteurs :

- Amélioration du support métallique : réduction de la demande en matériaux, réduction du poids et donc, réduction de l'investissement.
- Possibilité de production automatisée en grande série.
- Construction d'unités avec puissance optimale > 100 MW.
- Développement des composantes (matériaux et structure) pour augmenter la durée de vie et réduire les besoins de maintenance.

Figure 7 – Évolution probable du prix du kWh CSP en fonction de la puissance cumulée installée



Source : [http://www.solarpaces.org/\\_Library/GMI\\_10.pdf](http://www.solarpaces.org/_Library/GMI_10.pdf)

- Intégration de la composante de stockage et développement des systèmes de stockage thermique plus performants et moins coûteux.

Enfin, il faut retenir que les coûts de production du kWh d'origine fossile ou nucléaire sont variables, dépendant du marché des ressources (forte augmentation récente du prix du pétrole par exemple). Il faut bien sûr y ajouter les coûts représentatifs des impacts environnementaux.

Le tableau I présente une comparaison indicative des centrales au charbon et des centrales de type CSP avec stockage de chaleur.

## Retombées environnementales et socio-économiques

L'énergie solaire permet la production d'électricité, notamment sans émission de gaz à effet de serre.

Les besoins en matériaux pour la construction et l'équipement sont relativement importants. Toutefois, si la séparation des différents matériaux en fin de vie de la centrale est prise en considération dans la conception des équipements, le recyclage de ces matériaux peut se faire facilement et avec des bons rendements. Par ailleurs, il est considéré que l'énergie consommée lors de la fabrication des CSP est compensée actuellement en 5 mois de fonctionnement (temps de retour énergétique).

Les études concernant l'emploi relatif aux énergies renouvelables (production d'équipement, construction des installations, gestion et maintenance des unités de transformation) sont unanimes sur les retombées possibles importantes, voire plus importantes que pour les ressources fossiles (voir par exemple : études du Ministère fédéral de l'Environnement en Allemagne [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de) ; études réalisées en Espagne [www.istas.net/web/index.asp?idpagina=3371](http://www.istas.net/web/index.asp?idpagina=3371) ; rapport du PNUE Green Jobs : *Towards decent work in a sustainable, low-carbon world* [www.unep.org/labour\\_environment/features/greenjobs.asp](http://www.unep.org/labour_environment/features/greenjobs.asp)).

**Tableau I – Comparaison entre les centrales à charbon et les CSP avec stockage de chaleur**

		Charbon	Solaire CSP avec ST FC* >0,57
Ressource/Réserve		Abondante mais épuisable	Abondante et illimitée dans le temps
CO <sub>2</sub> /kWh		Intensité la plus élevée parmi les ressources fossiles utilisées, mais CSC possible	Nul ou négligeable
Coût actuel \$/MWh	Sans CSC	50 à 80	160 à 250
	Avec CSC	120 à 160	
	IGCC	60 à 90	
	IGCC + CSC	130 à 170	
Perspective du coût		En augmentation	En diminution
Impact CDM		Augmentation du coût	Diminution du coût
Transport entre site du gisement et consommateur pour des distances supérieures ou égales à 1 000 km		Charbon : bateau et train Électricité : HVAC	Électricité : HVDC

Légende : ST : stockage de chaleur. FC : Facteur de capacité. CSC : Captation et stockage de CO<sub>2</sub>. IGCC : Gazéification du charbon et cycle combiné intégré. HVAC : Courant alternatif haute tension. HVDC : Courant continu haute tension

## Nécessité de politiques d'appui

La pénétration de l'énergie solaire à concentration (et plus globalement des énergies renouvelables) requiert un engagement et un appui des gouvernements, notamment pour garantir leur compétitivité à moyen terme : besoin de tarifs d'achat garantis<sup>2</sup>, mix énergétique obligatoire, faciliter les possibilités de raccordement au réseau. Pour les pays en développement, les mécanismes tels que le Mécanisme de Développement Propre du Protocole de Kyoto, et l'appui des banques d'investissement peuvent contribuer au développement des projets de centrale solaire à concentration. Un appui déterminant l'utilisation des centrales CSP à grande échelle est l'ouverture de l'Europe à l'importation d'électricité depuis la région très bien ensoleillée, l'Afrique du Nord.

Par ailleurs, le programme adopté par le Sommet de constitution de l'Union pour la Méditerranée (UPM) pourrait aussi constituer une locomotive dans cette direction (voir [http://www.desertec.org/downloads/articles/letter\\_to\\_barroso\\_and\\_sarkozy\\_fr.pdf](http://www.desertec.org/downloads/articles/letter_to_barroso_and_sarkozy_fr.pdf)).

## Conclusion

Les intérêts d'une mobilisation de plus en plus importante des énergies renouvelables, et de l'énergie solaire de concentration en particulier, sont immenses et toucheront, certainement d'une façon différenciée, tous les pays et auront un impact bénéfique sur l'ensemble de la biosphère. Pour les uns, il y aura les possibilités d'investissements, d'exportations de technologies et de savoir-faire, ainsi que la garantie de couverture durable des besoins en énergies par des vecteurs propres à des prix stables. Pour les autres, il y aura les possibilités d'acquisition de nouvelles technologies, la mobilisation de ressources naturelles renouvelables et abondantes, augmentation considérable du PIB et par la suite, réduction de la pauvreté et du chômage. Mais ce

2. Cette politique incitative a permis récemment à l'Espagne, après l'expérience danoise et allemande au niveau d'énergie éolienne, de développer son secteur de production d'énergie solaire thermique à concentration, à la fois au plan de la production locale et du développement de l'industrie dans ce domaine.

développement nécessite une volonté de coopération globale ainsi que la mise en place des mesures adéquates avec la vitesse critique que nécessite l'état du développement et de la dégradation de l'environnement dans les différents pays. L'Agence Internationale pour les Énergies Renouvelables (IRENA) nouvellement créée est une étape importante dans cette direction.

## Références

- Abengoa Solar [http://www.abengoa.com/es/sites/solar/en/tec\\_termosolar.jsp](http://www.abengoa.com/es/sites/solar/en/tec_termosolar.jsp)
- Département américain de l'énergie (US DOE), Recherche sur le solaire à concentration <http://www1.eere.energy.gov/solar/csp.html>
- EcoSources, section solaire à concentration <http://www.ecosources.info/-Energie-renouvelable-Solaire-thermodynamique->
- Espace des énergies renouvelables, section solaire thermique à concentration [http://news.espace-enr.com/solaire\\_concentration/](http://news.espace-enr.com/solaire_concentration/)
- Goddard Institute for Space Studies, <http://www.giss.nasa.gov/research/news/20080116/>
- Greenpeace International and European Solar Thermal Power Industry (ESTIA), 2003. *Solar thermal power. 2020. Exploiting the heat from the sun to combat climate change.* <http://www.greenpeace.org/raw/content/international/press/reports/solar-thermal-power-2020.pdf>
- National Renewable Energy Laboratory, programme sur l'énergie solaire de concentration <http://www.nrel.gov/csp/>
- Pitz-Paál R., 2004. *Solar Power Technologies: Status and perspectives for dispatchable power supply.* (DLR).
- SolarPACES, programme de l'Agence internationale de l'énergie sur l'énergie solaire de concentration <http://www.solarpaces.org/>
- SOLLAB, Alliance de laboratoires européens pour la recherche et les technologies des systèmes solaires à concentration <http://www.sollab.eu/>
- World Energy Council, 2004. *Survey of energy resources, Chapter 11: Solar Energy.* <http://www.worldenergy.org/publications/324.asp>

## Sources d'information sur l'irradiation solaire

### Stations au sol

- World Meteorological organization <http://www.wmo.ch>
- World Radiation Data Center <http://wrdc-mgo.nrel.gov> et <http://www.mgo.rssi.ru>
- Global Energy Balance Archive <http://bsrn.ethz.ch/gebastatus>
- Baseline Surface Radiation network <http://bsrn.ethz.ch>
- International Daylight Measurement Prog <http://idmp.entpe-fr>

## Images satellites

National Center for Env Prediction and National Center for Atm Research  
<http://www.cdc.noaa.gov/PublicData>

European Center for Medium Range Weather Forecasts <http://data.ecmwf.int/data/>

NASA's Surface Meteo and Solar Energy <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>

Helioclim-I <http://helioclim.org>

Satel-Light <http://satel-light.com>

Solar Energy Mining <http://www.solemi.com>

## Autres

Meteonorm <http://www.meteonorm.com>

European Solar Radiation Atlas <http://helioclim.org/esra/>

Photovoltaic Geog Info service <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/pv>

US National Renewable Energy Laboratory <http://rredc.nrel.gov/>

Solar Info resource Service <http://www.iedat.com/sirs-ny/sirs-ny.php3>

Canadian Forest Service and CANMET Energy Technology <https://glfc.cfsnet.nfis.org/mapserver>

Solar and Wind Energy Resource Assessment <http://swera.unep.net>

SoDa Service <http://www.soda-is.com>

## Étude de cas

### Le concept DESERTEC<sup>3</sup>

#### Raisons du projet

Le concept DESERTEC a été conçu dans le but de mettre les déserts et la technologie au service d'une sécurité renforcée dans le domaine de l'énergie, de l'eau et d'une protection plus forte du climat. Dans ce but, il est proposé que l'Europe, le Moyen-Orient (Middle East) et l'Afrique du Nord (ensemble de régions noté EU-MENA) coopèrent pour la production d'électricité et d'eau dessalée en utilisant l'énergie solaire thermique à concentration et des éoliennes dans les déserts du MENA. Ces technologies peuvent répondre de plus en plus à la demande d'électricité et de dessalement d'eau de mer dans la région du MENA, et produire de l'électricité propre qui peut être exportée par des lignes de transmission en Courant Continu Haute Tension (HVDC selon la terminologie anglaise) avec de faibles pertes vers l'Europe (10 à 15%).

Ce concept a été développé par La Coopération Trans-Méditerranéenne pour les Energies Renouvelables (TREC – fondée en 2003 par le Club de Rome, la Fondation Hambourgeoise pour la Protection du Climat et le National Energy Research Center de Jordanie), en coopération avec le Centre aérospatial allemand (DLR) et plusieurs chercheurs et experts des pays EU-MENA.

#### Description

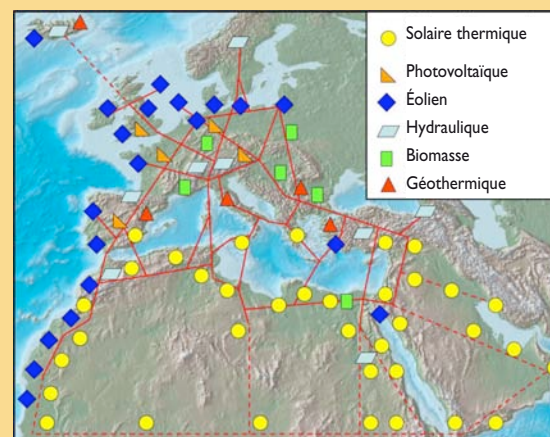
Trois études, financées par le Ministère Fédéral Allemand de l'Environnement, de la Protection de la Nature et de la Sécurité Nucléaire (BMU) et dirigées par le DLR, ont permis d'évaluer le potentiel des énergies renouvelables dans le MENA, les besoins attendus pour 2050 en énergie et en eau de ces pays, et la faisabilité d'une construction d'un réseau de transport électrique entre l'EU et le MENA (Connexion EU-MENA). Les études MED-CSP et TRANS-CSP concernent le potentiel d'énergie solaire de concentration et de transport vers l'Europe, et l'étude AQUA-CSP couvre les aspects relatifs au dessalement solaire de l'eau de mer.

#### Résultats techniques et financiers

Les études satellites réalisées par le DLR ont démontré qu'en utilisant moins de 0,3% de la surface totale des déserts de la région MENA, on peut produire suffisamment d'électricité et d'eau douce pour répondre à l'augmentation des besoins de ces pays et de l'Europe ainsi que la substitution progressive des ressources énergétiques épuisables et polluantes. La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne est particulièrement intéressante sur la côte atlantique et dans les régions autour de la mer Rouge, et à partir de l'énergie solaire dans la ceinture solaire de l'Atlantique au golf Persique. L'électricité d'origine solaire et éolienne peut être échangée entre les pays EU-MENA (voir figure et tableau ci-après) au moyen de lignes à Courant Continu à Haute Tension, dont les pertes en ligne peuvent être limitées à environ 3% pour 1000 km, soit un total de 15% de pertes de transmission entre le MENA et l'Europe. Ces pertes seraient compensées par le fait que les niveaux de radiation solaire dans les pays du MENA sont environ deux fois plus élevés que dans le centre de l'Europe. De plus, les variations saisonnières d'ensoleillement sont beaucoup plus faibles en MENA qu'en Europe. Les compagnies ABB et Siemens, ont confirmé la faisabilité technique d'une EU-MENA-Supergrid.

#### Schéma EU-MENA-Supergrid

Infrastructure possible pour un approvisionnement électrique durable en EU-MENA



3. Les sites: Desertec: <http://www.desertec.org/>; TREC-France: <http://www.trec-france.org/> contiennent: des présentations détaillées, l'ensemble des études et publications concernant le projet, des liens utiles, et sont actualisés constamment.



## Étude de cas (suite)

### Coûts et données techniques

Capacité, coûts et surface requise pour le développement de la connexion EU-MENA (notée HVDC) et des centrales solaires à concentration (notées CSP) entre 2020 et 2050, selon le scénario de TRANS-CSP

Année	2020	2030	2040	2050
Capacité de transfert GW	$2 \times 5$	$8 \times 5$	$14 \times 5$	$20 \times 5$
Transfert d'électricité TWh/y	60	230	470	700
Facteur de capacité	0.60	0.67	0.75	0.80
Chiffre d'affaires milliard €/y	3.8	12.5	24	35
Superficie CSP	$15 \times 15$	$30 \times 30$	$40 \times 40$	$50 \times 50$
km $\times$ km HVDC	$3100 \times 0.1$	$3600 \times 0.4$	$3600 \times 0.7$	$3600 \times 1.0$
Investissement CSP	42	143	245	350
milliard € HVDC	5	20	31	45
Coût électricité CSP	0.050	0.045	0.040	0.040
€/kWh HVDC	0.014	0.010	0.010	0.010

L'électricité en provenance des déserts est considérée pour l'Europe comme un complément aux ressources européennes en énergie renouvelable, ainsi qu'un moyen d'accélérer le processus de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et d'augmenter la sécurité et la stabilité d'approvisionnement énergétique. Pour les populations MENA, ce projet apporterait une fourniture d'énergie propre, des emplois, des sources de revenus, des infrastructures améliorées, des possibilités de dessalement d'eau de mer et de nombreux bénéfices potentiels (par exemple pour l'agriculture dans l'espace sous les miroirs Fresnel). Bien sûr, un tel déploiement exige une volonté claire de bon voisinage, de complémentarité et de respect mutuel, ainsi que le transfert progressif de la production des composantes des centrales vers le sud.

### Stratégie de mise en œuvre et financement

Le soutien gouvernemental sera nécessaire lors des premières étapes pour rendre la construction de centrales électriques et de

lignes de transmission attractive pour les investisseurs privés afin que suffisamment de capacité solaire soit construite d'ici à 2050 pour couvrir la demande croissante d'électricité en MENA et disposer de 100 GW de puissance électrique pour l'exportation vers l'Europe (l'équivalent d'environ 100 tranches nucléaires). Selon le DLR, moins de 10 milliards d'euros d'aide publique seraient nécessaires pour rendre la technologie CSP compétitive avec les centrales électriques à combustibles fossiles.

Des tarifs d'achat garantis et des garanties sur les investissements, tels qu'existant déjà dans plusieurs pays, seraient également nécessaires. Il serait très utile que des politiques possibles de tarifs d'achat garantis en MENA soient appuyées par des « Crédits Énergies Renouvelables », que les pays européens achèteraient, afin d'atteindre leurs objectifs dans la protection du climat. Une attention particulière doit être maintenue pour s'assurer que les capacités de production d'énergie renouvelable sur le territoire européen soient développées. Dans le Scénario TRANS-CSP, la couverture de la demande européenne d'électricité en 2050 proviendrait à 65% d'énergies renouvelables européennes, 17% d'importations d'électricité solaire et 18% de centrales thermiques de substitution et de pointe.

Au plan technique, une étape primordiale à la mise en œuvre de ce concept réside dans la construction le plus tôt possible de connexions Courant Continu à Haute Tension.

### Conclusion

Les études du DLR confirment le potentiel de l'énergie solaire et éolienne au Moyen-Orient et en Afrique du Nord. L'évolution des réserves énergétiques et la situation climatique renforcent l'urgence d'appliquer le concept DESERTEC. Les technologies requises sont disponibles et la volonté politique ainsi qu'un cadre incitatif adéquat sont aujourd'hui nécessaires pour mettre en œuvre le concept DESERTEC.

### Références

Desertec: <http://www.desertec.org/>

TREC-France: <http://www.trec-france.org/>

Études réalisées par le DLR: <http://www.dlr.de/tt/med-csp>, <http://www.dlr.de/tt/trans-csp>, <http://www.dlr.de/tt/aqua-csp>



Institut de l'énergie et de l'environnement  
de la Francophonie  
IEPF

L'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (IEPF) est un organe subsidiaire de l'Organisation internationale de la Francophonie (OIF). Il est né en 1988 de la volonté des chefs d'État et de gouvernement des pays francophones de conduire une action concertée visant le développement du secteur de l'énergie dans les pays membres. En 1996, cette action a été élargie à l'Environnement. Basé à Québec (Canada), l'Institut a aujourd'hui pour mission de contribuer au renforcement des capacités nationales et au développement de partenariats dans les domaines de l'énergie et de l'environnement.

Institut de l'énergie et de l'environnement  
de la Francophonie (IEPF)  
56, rue Saint-Pierre, 3<sup>e</sup> étage  
Québec (QC) G1K 4A1 Canada  
Téléphone: (1 418) 692 5727  
Télécopie: (1 418) 692 5644  
Courriel: [iepf@iepf.org](mailto:iepf@iepf.org)  
Site Web: [www.iepf.org](http://www.iepf.org)



Imprimé avec des encres végétales sur du papier dépourvu d'acide et de chlore et contenant 50% de matières recyclées dont 15% de matières post-consommation.

Imprimé en décembre 2008

### Les fiches techniques PRISME

(Programme International de Soutien à la Maîtrise de l'Énergie) sont publiées par l'IEPF.

Directrice de la publication:

Fatimata DIA Touré, directrice, IEPF

Comité éditorial:

Sibi Bonfils, directeur adjoint, IEPF

Jean-Pierre Ndoutoum, responsable de programme, IEPF

Supervision scientifique et technique:

Maryse Labriet, Environnement Énergie Consultants

Rédaction:

Abdelaziz Bennouna, Ancien responsable de l'Unité de Recherche « Technologies et Économie des Énergies Renouvelables », Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique, Maroc.

[azzouzbenouna@gmail.com](mailto:azzouzbenouna@gmail.com)

Édition et réalisation graphique:

Communications Science-Impact